

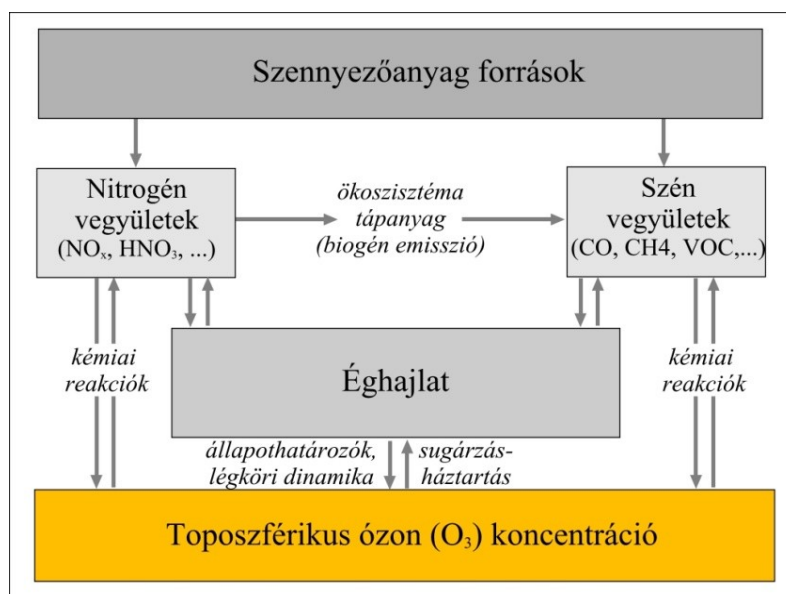
## AZ ÓZON NÖVÉNYZETKÁROSÍTÓ HATÁSA

Mészáros Róbert 

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A  
e-mail: mrobi@nimbus.elte.hu

### Bevezetés

Az ózon ( $O_3$ ) a troposzféra egyik legjelentősebb légszennyező anyaga. Szerepet játszik a szén és nitrogén ciklusban, üvegházhatású gázként befolyásolja a Föld-légkör rendszer sugárzás-háztartását, a felszínközeli légrétegben pedig károsan hat az emberi egészségre és a növény-állományok állapotára. Az ózon másodlagos légszennyező, vagyis közvetlen forrása nincs; a légkörben levegőkémiai folyamatok révén keletkezik egyéb légszennyezőkből (Lagzi et al., 2013). A légköri ózonkoncentráció számos folyamat kölcsönhatásaként alakul ki, melyekről az 1. ábra nyújt sematikus képet.



1. ábra: A troposzférikus ózon koncentrációját meghatározó legfontosabb kölcsönhatások (Monks et al., 2015. alapján).

### A troposzférikus ózon mennyisége

A teljes légköri ózontartalom nagyjából 90%-a sztratoszférában, míg kb. 10%-a a troposzférában található. A troposzférikus ózon kevesebb, mint 20%-a található az alsó troposzférában (800 hPa alatt) (Lamarque et al., 2005). Ez, a teljes légköri ózontartalomhoz képest kis mennyiség azonban kiemelt jelentőségű a városi levegőminőség, valamint a különböző felszíneket – elsősorban növényállományokat – érő terhelés szempontjából.

A troposzférában található ózon globális mérlegét különböző kémiai modellekkel írják le. A mérleg egyes tagjainak nagy a bizonytalansága, mert azok erősen függenek a légkör meteorológiai és levegőkémiai állapotától. Összességében, a troposzférikus ózon forrását elsősorban a kémiai folyamatok jelentik, melyek során különböző prekursor anyagokból ( $NO_x$ , CO,

különbőle szerves anyagok, növények terpén és izoprén termelése stb.) keletkezik, illetve kisebb mértékben a sztratoszférából keveredik le az alsóbb rétegekbe. Az ózont elsősorban kémiai nyelők vonják ki a légkörből, de egy jelentős része száraz ülepedéssel kerül a felszínre (1. táblázat). Az ózon nedves ülepedése elhanyagolható, mivel vízben nem, vagy csak nagyon csekély mértékben oldódik.

1. táblázat: Troposzférikus ózonmérleg különböző modellszimulációk alapján.  
Az értékek Tg O<sub>3</sub> év<sup>-1</sup>-ben vannak megadva.

		Forrás tagok		Nyelő tagok	
		Kémiai keletkezés	Lekeveredés a sztratoszférából	Kémiai bomlás	Száraz ülepedés
Multi-modell <sup>a</sup> (1995–2006)	átlag	3948	636	3745	902
	szórás	(±761)	(±273)	(±554)	(±255)
GEOS-Chem <sup>b</sup> (2005–2013)	(1)	4960	325	4360	908
	(2)	4630	304	4090	856
	(3)	5530	492	4960	1040

<sup>a</sup> Wild (2007); <sup>b</sup> Hu et al. (2017)

(1) GEOS-Chem v10-01 modell, standard futtatás 2012–2013-ra

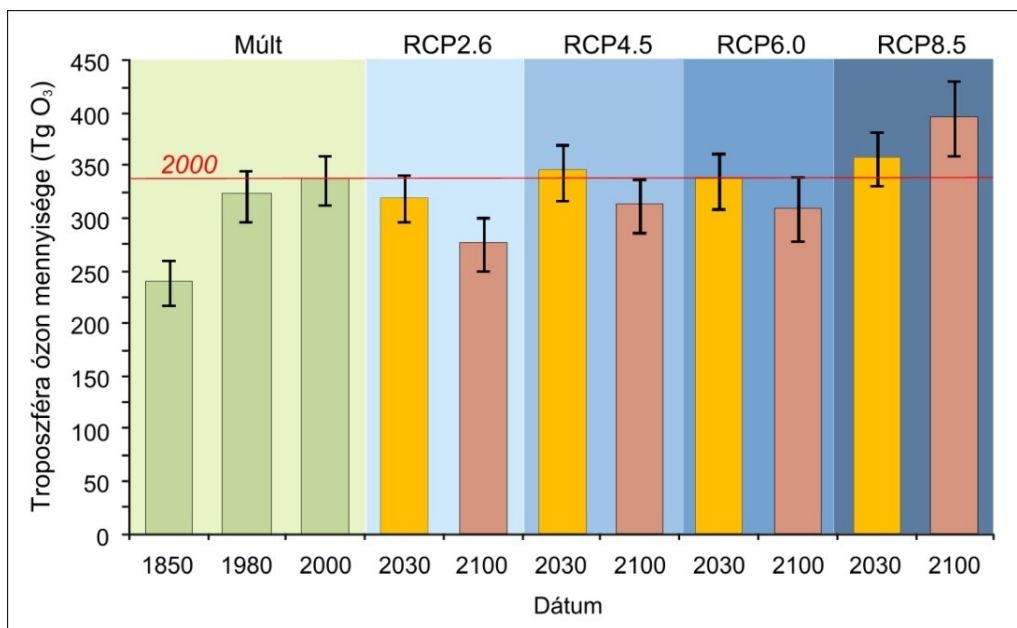
(2) minimum és (3) maximum értékek különböző meteorológiai és levegőkémiai kezdeti feltételekkel

A korábbi szimulációkhoz képest az újabb modellek alapján jelentősebb a kémiai folyamatok során a troposzférában keletkező és lebomló ózon mennyisége, ami a kémiai folyamatokban szerepet játszó légköri összetevők megnövekedett kibocsátásának tudható be. Ugyanakkor a troposzféra-sztratoszféra ózon kicserélődés globálisan kisebb mértékű az újabb modellszimulációk alapján. A száraz ülepedés mértékében jelentős változás nem tapasztalható.

A troposzférában található össz-ózon mennyisége 345–357 Tg, átlagos tartózkodási ideje 20,9–24,2 nap (Hu et al., 2017). A felszín közelében azonban, szennyezettebb környezetben, az ózon tartózkodási ideje ennél jóval rövidebb – jellemzően néhány óra – ami az ózon légköri ciklusában szerepet játszó vegyületek nagyobb koncentrációjának köszönhető.

## A troposzférikus ózon mennyiségének változása

Az elmúlt évtizedekben az ózon mennyisége a troposzférában – egyben a felszín közelében is – világszerte folyamatosan növekedett (Cooper et al., 2014). Ez számos komoly környezeti problémát okoz, és mind az emberi egészséget (Weschler, 2006), mind a növények működését (Ainsworth et al., 2012) károsan befolyásolja. A felszínközeli ózon képződésében szerepet játszó, ún. prekursor vegyületek emissziójának előrejelzett változásai, továbbá levegőminőségi modellszimulációk alapján (l. pl. Emberson et al., 2018) további növekedés következhet be az ózonkoncentráció értékeiben a 21. században egyes területeken, ami a továbbiakban is károsan befolyásolhatja a természetes és termesztett növényállományok állapotát. Az előrejelzett változás mértéke eltérő a Föld egyes régióiban (Emberson et al., 2018) és attól is függ, hogy milyen mértékben változik az éghajlat. A 2. ábra a troposzféra össz-ózon mennyiségének modellezett értékeit mutatja a múlt és a jövőre vonatkozóan.



2. ábra: A troposféra össz-ózon mennyiségének modellezett értékei a múlt, valamint a közeli (2030) és a távoli (2100) jövőre vonatkozóan, különböző klíma scenáriók (RCP-k) esetére.

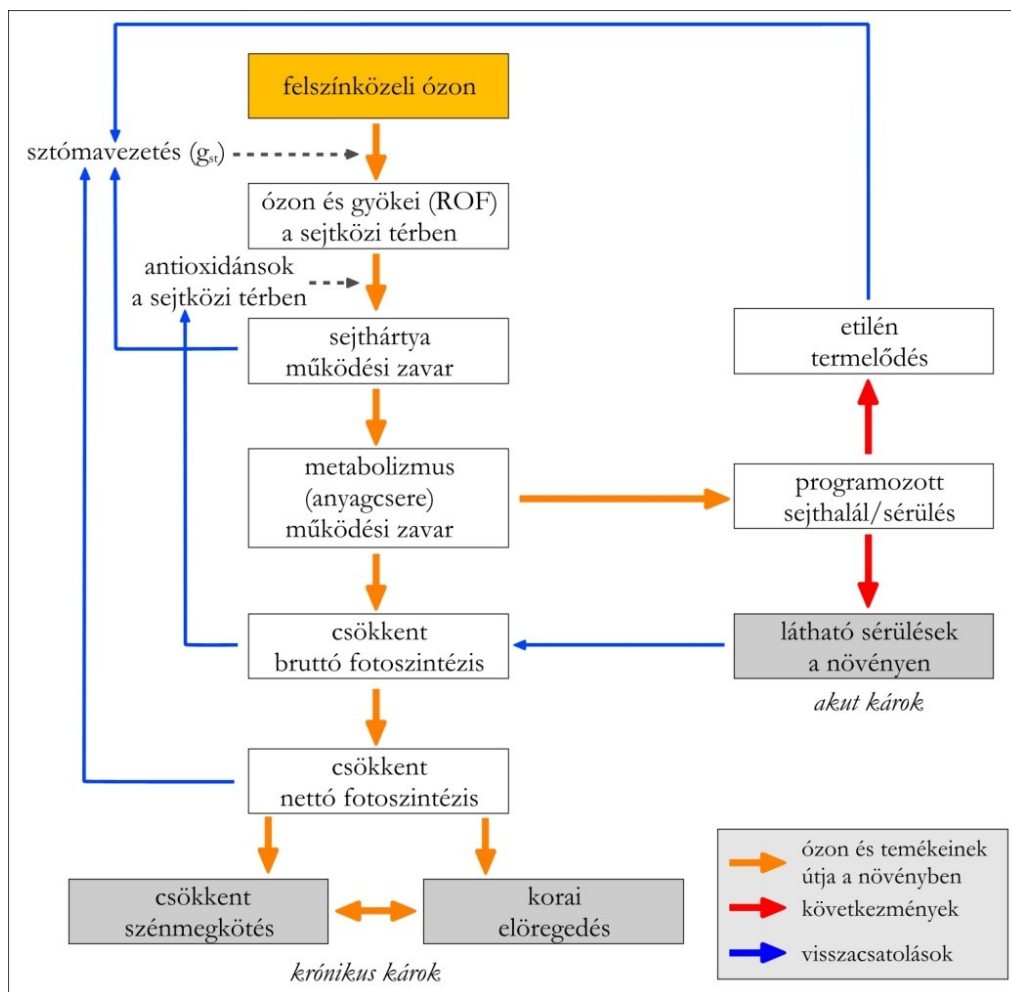
A grafikonon feltüntetett értékek az ACCMIP program (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project) keretében alkalmazott modellek átlagai, szórásokkal (adatok forrása: Young et al., 2013).

### Az ózon növényzetkárosító hatása

Az ózon többféle módon károsíthatja a növényzetet (Wilkinson et al., 2012), az egyes mezőgazdasági és kertészeti növények érzékenysége pedig eltérő az ózonszennyezésre. A megnövekedett ózonkoncentráció látható károsodást okozhat a növényekben, csökkentheti a légcserenyílások (sztómák) működését, a környezeti feltételektől és a vegetáció típusától függően csökkenő terméshozamot eredményezhet, csökkentheti a fák biomassza növekedését, továbbá befolyásolhatja a növények szén-dioxid megkötő képességét, ami indirekt módon hatást gyakorolhat az éghajlatváltozásra is.

Az ózon elsősorban a légcserenyílásokon (sztómákon) keresztül jut a növénybe. Itt nagyon rövid ideig él (az ózon növényen belüli koncentrációját ezért elhanyagolhatjuk), viszont számos reaktív oxigén forma (ROF) kialakulását eredményezheti (ilyenek például a hidrogénperoxid –  $H_2O_2$ , a szuperoxid-gyök –  $O_2^-$ , vagy a hidroxil-gyök –  $HO$ ). Ezen anyagok reakcióba lépve a növényi sejtekkel, különböző növénykárosító hatást okozhatnak, befolyásolva a sejtek működését és a növényi anyagcserét. Ráadásul egyes folyamatok visszahatnak a sztómák működésére is. A tartós, magasabb ózon koncentráció krónikus károkat, míg a rövidebb idejű, de kiugróan magas koncentrációjú ózon epizódok látható sérüléseket okoznak a növényzeten (Emberson et al., 2018). Az ózon által a növényen belül indukált folyamatok és visszacsatolások sematikus képét mutatja a 3. ábra.

Az ózon mennyiségének és károsító hatásának leírására számos mérőszámot alkalmaznak, amiket klímaváltozással kapcsolatos kutatások, az emberi egészségre, valamint a növényállományokra gyakorolt károsító hatások jellemzésére vezettek be (Lefohn et al., 2018).



3. ábra: Az ózon és termékeinek (reaktív oxigén formák – ROF) károsító hatásai a növényi sejtekre és anyagcserére (Emberson et al., 2018. alapján).

### A növényzetkárosító hatás becslése

A növényzetkárosító hatást az ózon felszínközeli koncentrációja, vagy fluxusa alapján becsülhetjük. A koncentráció alapú becslés egyszerűbb, az ózon felszínközeli koncentrációja alapján általában egy határérték feletti mennyiséget összegeznek egy megadott időszakra (pl. AOTxx, SOMO35). A tényleges károsító hatást azonban jobban jellemzik a fluxus alapú mérőszámok (Musselman et al., 2006). Ilyenek például az ózon teljes fluxusa, a sztómákon keresztüli fluxus, vagy annak valamilyen határérték feletti összege (pl. PODy).

Az ózon felszínközeli fluxusát mikrometeorológiai mérések, vagy ülepedési modellek segítségével adhatjuk meg. A fluxus arányos a felszíni és a felszínközeli (a mérés szintjén, vagy egy modell legalsó szintjén vett) koncentráció különbségével, de ózon esetén a felszíni (levélen belüli) koncentráció gyakorlatilag zérus, ezért elegendő a felszínközeli koncentráció ismerete. A kapcsolatot a koncentráció és a fluxus között az ülepedési sebesség ( $v_d$ ) adja meg, amit leggyakrabban az ülepedésre ható tényezők (ellenállások) eredőjeként származtatnak (l. pl. Lagzi et al., 2006, Mészáros et al., 2009a).

Az ülepedés leírásában kitüntetett szerepe van a sztómákon keresztüli áramnak, mert a növényzet belsejébe elsősorban a sztómákon keresztül jut be az ózon. Ennek becslésére két alapvető módszer terjedt el, a meteorológiai és a fiziológiai megközelítés. A meteorológiai megközelítés a rövidhullámú sugárzás és környezeti tényezők (lég hőmérséklet, légnedvesség,

talajnedvesség) aktuális értékei által kifejtett stressz-hatások függvényében írja le a sztómákon keresztüli ülepedést gátló sztómaellenállást. A sztómák ellenállását az egyes tényezők eltérő mértékben befolyásolják (Mészáros et al., 2006; 2009b, c).

A fiziológiai (növényélettani) megközelítés során a sztómavezetést (a sztómaellenállás reciprokát) leíró modellek a meteorológiai tényezők mellett a növényre vonatkozó mennyiségeket is figyelembe vesznek. Ilyenek például a nettó szén-dioxid megkötés, valamint a szén-dioxid koncentráció (levél felületen, és levél belsejében meghatározott) értékei (Niyogi és Raman, 1997), vagy az ózon hosszútávú, kumulatív hatását és a növény fenológiai állapotát is figyelembe vevő algoritmusok (Pleijel, 2007).

Az ózon koncentráció és a sztómákon keresztüli ülepedés ismeretében pedig termésbecslőmodellekkel a terméskiesés is becsülhető (Emberson et al., 2018; Schauburger et al., 2019).

## Köszönetnyilvánítás

A témában végzett kutatásokat a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap K-128805-K128818 pályázatai támogatták.

## Hivatkozások

- Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S., Collins, W.J., Emberson, L.D., 2012: The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change. *Annual Review of Plant Biology*, 63: 637–661. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- Cooper, O.R., Parrish, D.D., Ziemke, J., Balashov, N.V., Cupeiro, M., Galbally, I.E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N.R., Lamarque, J.-F., Naik, V., Oltmans, S.J., Schwab, J., Shindell, D.T., Thompson, A.M., Thouret, V., Wang, Y., Zbinden, R.M., 2014: Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elementa*, 2: 29. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000029>
- Emberson, L.A., Pleijel, H., Ainsworth, E.A., van den Berg, M., Ren, W., Osborne, S., Mills, G., Pandey, D., Dentener, F., Büker, P., Ewert, F., Koeble, R., Van Dingenen, R., 2018: Ozone effects on crops and consideration in crop models. *European Journal of Agronomy*, 100: 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.06.002>
- Hu, L., Jacob, D.J., Liu, X., Zhang, Y., Zhang, L., Kim, P.S., Sulprizio, M.P., Yantosca, R.M., 2017: Global budget of tropospheric ozone: Evaluating recent model advances with satellite (OMI), aircraft (IAGOS), and ozonesonde observations. *Atmospheric Environment*, 167: 323–334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.036>
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, Gy., Leelőssy, Á., 2013: Atmospheric Chemistry. ELTE. <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/index.html>
- Lagzi, I., Mészáros, R., Ács, F., Tomlin, A.S., Haszpra, L., Turányi, T., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part I: model development. *Időjárás*, 110: 349–363.
- Lamarque, J.-F., Hess, P., Emmons, L., Buja, L., Washington, W., Granier, C., 2005: Tropospheric ozone evolution between 1890 and 1990. *Journal of Geophysical Research*, 110: D08304. <http://doi:10.1029/2004JD005537>
- Lefohn, A.S., Malley, C.S., Smith, L., Wells, B., Hazucha, M., Simon, H., Naik, V., Mills, G., Schultz, M.G., Paoletti, E., De Marco, A., Xu, X., Zhang, L., Wang, T., Neufeld, H.S., Musselman, R.C., Tarasick, D., Brauer, M., Feng, Z., Tang, H., Kobayashi, K., Sicard, P., Solberg, S., Gerosa, G., 2018: Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa*, 6: 28. <https://doi.org/10.1525/elementa.279>

- Mészáros, R., Lagzi, I., Juhász, Á., Szinyei, D., Vincze, Cs., Horányi, A., Kullmann, L. and Tomlin, A.S., 2006: Description and evaluation of a coupled Eulerian transport-exchange model: Part II: sensitivity analysis and application. *Időjárás*, 110: 3–4. 365–377.
- Mészáros, R., Horváth, L., Weidinger, T., Neftel, A., Nemitz, E., Dämmgen, U., Cellier, P., Loubet, B., 2009a: Measurement and modelling ozone fluxes over a cut and fertilized grassland. *Biogeosciences*, 6: 1987–1999. <https://doi.org/10.5194/bg-6-1987-2009>
- Mészáros R., Zsély I.Gy., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., 2009b: Sensitivity analysis of an ozone deposition model. *Atmospheric Environment*, 43: 663–672. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.058>
- Mészáros, R., Szinyei, D., Vincze, Cs., Lagzi, I., Turányi, T., Haszpra, L., Tomlin A.S., 2009c: Effect of the soil wetness state on the stomatal ozone fluxes over Hungary. *Int. J. Environment and Pollution*, 36: 180–194. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021825>
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L., 2015: Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.*, 15: 8889–8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>
- Musselman, R. C., Lefohn, A. S., Massman, W. J., and Heath, R. L. 2006: A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment*, 40: 1869–1888. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.064>
- Niyogi, D.S., Raman, S., 1997: Comparison of Four Different Stomatal Resistance Schemes Using FIFE Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol*, 36: 903–917. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<0903:COFDSR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<0903:COFDSR>2.0.CO;2)
- Pleijel, H., Danielsson, H., Emberdon, L., Ashmore, M.R., Mills, G., 2007: Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux-response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment*, 41: 3022–3040. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.002>
- Schauberger, B., Rolinski, S., Schaphoff, S., Müller, C., 2019: Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.004>
- Young, P.J., Archibald, A.T., Bowman, K.W., Lamarque, J.-F., Naik, V., Stevenson, D.S., Tilmes, S., Voulgarakis, A., Wild, O., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Cionni, I., Collins, W.J., Dalsøren, S.B., Doherty, R.M., Eyring, V., Faluvegi, G., Horowitz, L.W., Josse, B., Lee, Y.H., MacKenzie, I.A., Nagashima, T., Plummer, D.A., Righi, M., Rumbold, S.T., Skeie, R.B., Shindell, D.T., Strode, S.A., Sudo, K., Szopa, S., Zeng, G., 2013: Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmos. Chem. Phys.*, 13: 2063–2090. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2063-2013>
- Weschler, C.J., 2006: Ozone's Impact on Public Health: Contributions from Indoor Exposures to Ozone and Products of Ozone-Initiated Chemistry. *Environ Health Perspect*, 114(10): 1489–1496. <https://doi.org/10.1289/ehp.9256>
- Wild, O., 2007: Modelling the global tropospheric ozone budget: exploring the variability in current models. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 2643–2660. <https://doi.org/10.5194/acp-7-2643-2007>
- Wilkinson, S., Mills, G., Illidge, R., Davies, W.J., 2012: How is ozone pollution reducing our food supply? *J. Experimental Botany*, 63(2): 527–536. <https://doi.org/10.1093/jxb/err317>

## ORCID

Mészáros R.  <https://orcid.org/0000-0002-0550-9266>